高原山地石漠化过程中土壤团聚体稳定性及其化学计量特征

陈静，朱大运，陈浒*，陈海

（贵州师范大学喀斯特研究院/国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心/中国南方喀斯特生态环境学科创新引智基地("111 基地")/贵州省喀斯特山地生态环境省部共建国家重点实验培育基地，贵阳 550001）

摘要：石漠化演替过程中不同石漠化等级土壤团聚体稳定性及其碳氮磷化学计量特征是评价石漠化地区土壤恢复效应的有效途径。本文以 5 个不同石漠化等级的样地为研究对象，利用湿筛法分析 0~20 cm 土层土壤不同粒级团聚体分布状况、稳定性水平和化学计量特征。结果表明：(1)相较而言，无石漠化样地中>2 mm 和 0.25~2 mm 两级水稳性团聚体含量最高，其平均直径（MWD、GMD）最大，而可蚀性 K 值最低。(2)不同石漠化环境中团聚体有机碳、全氮和全磷的变化范围是 20.78~56.28 $g\cdot kg^{-1}$、1.17~2.14 $g\cdot kg^{-1}$ 以及 0.41~0.97 $g\cdot kg^{-1}$，无石漠化样地各级团聚体有机碳、全氮含量较高，全磷含量在 5 种环境中变化规律不明显；团聚体 C/N、C/P 和 N/P 的变化范围分别是 11.50~28.60、25.19~121.75 和 1.65~4.69，无石漠化样地团聚体 C/N、C/P 和 N/P 均明显高于潜在、轻度、中度和强度，较小粒径 C/N 较高，而 C/P 和 N/P 较高为>2 mm 和 0.25~2 mm 两粒径。(3)团聚体中有机碳分别与其 C/N、C/P 呈极显著正相关，而全磷含量则与 C/P、N/P 两者呈极显著负相关($P<0.01$)，团聚体 C/N、C/P 和 N/P 变异水平表现为 C/P>C/N>N/P。该地从无石漠化到强度石漠化演替过程中土壤团聚体稳定性和各粒径团聚体中有机碳和全氮含量均呈现先下降后上升的趋势，无石漠化土壤结构较好，团聚体中 N 元素成为影响该退化生态系统中土壤质量的主要限制性元素。

关键词：团聚体稳定性，化学计量特征，团聚体养分，石漠化等级

中图分类号：Q948 **文献标识码：**A

Soil aggregate stability and its stoichiometric characteristics in the process of rocky desertification in plateau mountains

CHEN Jing, ZHU Dayun, CHEN Hu*, CHEN Hai

(*School of Karst Science, Guizhou Normal University/State Engineering Technology Institute for Karst Rocky Desertification Control/Overseas Expertise Introduction Center for Discipline Innovation* ("*111 Center*")*/The State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province*, Guiyang 550001, China)

Abstract: Soil aggregate stability and its stoichiometric characteristics are the effective ways to evaluate the effect of soil restoration in rocky desertification areas. Five plots with different rocky desertification grades were set up. Indicators including the content, stoichiometry, and stability of different aggregate fractions were analyzed by wetting. The results were as follows: (1) In

---

基金项目：国家十三五重点研发计划项目（2016YFC0502601）；国家自然科学基金项目（41907042）；贵州教育厅青年科技人才成长项目（黔教合 KY 字[2018]127）；贵州省科技支撑计划（黔科合支撑[2018]2777）[Supported by the National Key Research and Development Program of China in the 13th Five-year Plan (2016YFC0502601); the National Natural Science Foundation of China (41907042); the Youth Science and Technology Talent Support Program of Guizhou Education Department (KY[2018]127); the Guizhou Science and Technology Supporting Plan([2018]2777)]。

作者简介：陈静(1996-)，硕士研究生，主要从事喀斯特地貌与洞穴研究，(E-mail) wmclwzs2 @126.com。

***通信作者：**陈浒，教授，硕士研究生导师，主要从事喀斯特生态与环境研究，(E-mail)gy_chenhu@163.com。

comparsion, the contents of water stable aggregates > 2 mm and 0.25-2 mm were the highest in the nil rocky desertification plots, and their average diameters (MWD and GMD) were the largest, but the K value of erodibility is the lowest. (2) The soil organic carbon, nitrogen, and phosphorus contents in the five sample plots were 20.78-56.28 $g·kg^{-1}$, 1.17-2.14 $g·kg^{-1}$ and 0.41-0.97 $g. kg^{-1}$, respectively. The composition of organic carbon and total nitrogen in aggregates of the nil rocky desertification sample plot were the highest, and the variation of total phosphorus content was not obvious in the five environments. The range of C/N, C/P and N/P of five environmental aggregates is 11.50-28.60, 25.19-121.75 and 1.65-4.69, respectively. The C/N, C/P and N/P of the aggregate in the nil rocky desertification sample plot were significantly highest. Averaged C/N values in the small-size aggregates were higher than in aggregates of other sizes, while the maximum values C/P and N/P was >2mm and 0.25-2mm. (3) There was a significant positive correlation between organic carbon and C/N, C/P, and a significant negative correlation between total phosphorus and C/P, N/P($P<0.01$).The overall trend of the variation level of soil aggregate stoichiometry is C/P>C/N>N/P. The stability and the contents of organic carbon and total nitrogen in aggregates with different particle sizes decreased firstly and increased from nil rocky desertification to severe rocky desertification in the study area. The soil structure of nil rocky desertification is good; what is more, N in the aggregate is the major factor affecting the soil quality in the degraded ecosystem.

Key words: aggregate stability, stoichiometric characteristics, aggregate nutrients, rocky desertification level

土壤团聚体是土壤颗粒与有机-无机胶体作用形成的多孔、类似于球体的土团，是土壤结构的基本组成单元（Six et al., 2000），其数量和质量是影响土壤理化性质的关键指标之一(刘杰等，2019)。团聚体稳定性水平决定了土壤结构的优劣（Blanco & Lal, 2004）。徐红伟等(2018)研究发现土壤中>0.25mm 粒级团聚体含量越多及团聚体平均重量直径、几何平均直径越大，团聚体稳定性水平越高，土壤结构越好；同时也将其作为量化土壤抗蚀性水平的重要指标（郭伟等，2007），团聚体稳定性越高，土壤抵抗流水侵蚀的能力越强（安韶山等，2008）。团聚体作为土壤养分存储和转化的载体，由于各级团聚体的数量和组成物质不同，导致它在碳、氮和磷养分中的保持和供应作用不同（Udom & Ogunwole., 2015），同时不同粒径团聚体中碳、氮、磷元素的稳定性和转化能力也不同（Devine et al., 2014），因此土壤团聚体粒径分布和稳定性水平与碳氮磷养分含量变化密切相关。生态化学计量学是从元素的角度出发，研究元素平衡与生态系统间交互作用的理论（王绍强和于贵瑞，2008）,主要分析结构性元素（碳）和限制性元素（氮、磷）三者间的关系(李玮等，2015)。土壤团聚体养分及化学计量特征受植被覆盖、根系结构、微生物活性等因素影响(Xu et al., 2016)，因此不同粒级团聚体碳、氮、磷含量分配及化学比存在明显差异(Xiao et al., 2017)。研究土壤团聚体中碳、氮、磷含量及其化学计量比变化特征，能掌握土壤碳、氮和磷元素在微观结构上的分布状况，有利于深入了解土壤养分的供应和保持能力。

西南喀斯特地区由于特殊的地理环境以及长期受到人为活动的干扰，导致地表土壤大面积退化，石漠化现象严重(郭柯等，2011)。贵州是典型的喀斯特山区农业大省，喀斯特面积超过全省总面积的 70%，目前该省贫困人口集中，人地矛盾突出，石漠化已成为影响该区域社会经济发展的重要生态问题（熊康宁等，2011）。近年来众多学者提倡将自然恢复和人工林草植被恢复结合进行石漠化治理，而团聚体作为衡量喀斯特生态恢复的重要因子之一，现已开展部分研究。王佩将等(2014)将>0.25mm 粒径的水稳性团聚体作为评价土壤抗蚀性的最佳指标之一；罗明和周运超(2010)认为不同母岩发育的土壤团聚体稳定性存在明显的差异，其中稳定性水平最高的是石灰岩发育的土壤团聚体；卢怡等(2017)研究发现种植花椒林能有效提高土壤团聚体稳定性，增强团聚体对有机碳的保护作用。目前团聚体研究集中于土地利

用方式/植被恢复对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响(王浩等，2017；刘杰等，2019；王进等，2019)，研究地点在岩溶峡谷区、峰丛洼地区以及槽谷区均有涉及（谭秋锦等，2014；俞月凤等，2014；蓝家程和沈艳，2020），但对喀斯特石漠化区土壤团聚体养分化学计量特征的认识尚浅。因此，本文重点关注两个问题：（1）喀斯特高原山地地区不同石漠化等级环境中土壤团聚结构稳定性水平；（2）不同石漠化土壤团聚结构中碳、氮、磷元素含量变化及生态化学计量特征，旨在揭示石漠化演替过程中土壤团聚体稳定性的变化趋势及团聚体内碳、氮和磷三者的分布状态和平衡关系，以期为后续的石漠化生态治理工作提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选择黔西北毕节撒拉溪石漠化综合治理区为研究区域，其中心点坐标是（105°06'37" E、27°15'12" N），平均海拔 1 600 m，以高原山地地貌为主，地面起伏大，喀斯特地貌占区域总面积的 74.26%，石漠化等级以潜在—轻度为主。区内年均气温 12.9 ℃，大于等于 10 ℃积温介于 4 109~4 300 ℃之间，雨季为 6—8 月，年均降水量 900 mm 左右，地表出露岩石主要是石灰岩和页岩，土壤以黄壤为主。由于人为干扰和土壤侵蚀，原生常绿落叶针阔混交林植被几乎被亮叶桦(*Betula luminifera*)、响叶杨(*Populus adenopoda*)、山杨(*Populus davidiana*)等次生林所替代。潜在石漠化区域为金丝桃(*Hypericum monogynum*)、腊瓣花(*Corylopsis sinensis*)、基及树(*Carmona microphylla*)等为主的次生灌丛；轻度石漠化环境为红花龙胆(*Gentiana rhodantha*)、刺梨(*Rosa roxbunghii*)、败酱(*Cinnamomum longepaniculatum*)、忍冬(*Lonicera japonica*)等为主的次生灌草丛；中度石漠化区由火棘（*Pyracantha fortunean*)、败酱(*Cinnamomum longepaniculatum*)、马桑(*Coriaria nepalensis*)等组成的次生灌草丛；强度环境主要有金丝桃(*Hypericum monogynum*)、蒿草(*Artemisia argyi*)、野棉花(*Anemone vitifolia*)、千里光(*Senecio scandens*)等稀疏灌草丛。研究样地土壤环境基本信息详见表 1。

1.2 样品采集及处理

按照熊康宁等（2002）对石漠化等级的划分方法，选择无石漠化(ND)次生林、潜在石漠化(PD)灌木林、轻度石漠化(LD)灌草地、中度石漠化(MD)草地和强度(SD)石漠化裸露地 5 种环境的土壤进行研究。2019 年 9 月，在研究区针对 5 种石漠化环境分别设置 3 个 20 m × 20 m 的平行样方，总共建立 15 个取样地，每个样地按“S”形选择 3 个采样点，采集 0~20 cm 表层原状土样共 45 个，用保鲜盒带回实验室，用于团聚体筛分实验。称取自然风干后的土壤 50 g，采用团聚体分析仪（XY-100）湿筛分离出>2 mm、0.25~2 mm、0.053~0.25 mm 和<0.053 mm 四级团聚体，40 ℃烘干称重，该处理方式重复三次，最后取其均值进行相关计算。每一粒级团聚体分别过 0.149 mm 筛，用于有机碳、全氮和全磷测定。有机碳使用重铬酸钾容量法—油浴(GB7857-87)测定，全氮和全磷分别使用硫酸-硒粉（硫酸铜和硫酸钾）催化剂和硫酸-高氯酸消解定容后，提取滤液采用连续流动分析仪（SEALAA3,德国）测定。

1.3 数据统计分析处理

利用湿筛处的数据计算团聚体的稳定性指标，包括平均重量直径 MWD、几何平均直径 GMD（Wei et al., 2013）和可蚀性 K 值（Shirazi & Boersma, 1984），计算公式如下：

$$\mathrm{MWD}=\frac{\sum_{i=1}^{n} W_i \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^{n} W_i} \quad (1)$$

$$\mathrm{GMD}=EXP\left[\frac{\sum_{i=1}^{n} W_i \ln \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^{n} W_i}\right] \quad (2)$$

式中：Xi 为各级团聚体的平均直径（mm）；Wi 为各级团聚体数量。

$$K=7.954\times\{0.0017+0.0494\times\exp[-0.5\times(\lg GMD+1.675/0.6986)^2]\} \quad (3)$$

某一粒径团聚体养分富集系数（张钦等，2019）(enrichment coefficient) =对应团聚体

养分含量/全土养分含量。

某一粒径团聚体养分贡献率（邱莉萍等，2006）=（对应团聚体中养分含量×对应团聚体含量）/全土养分含量×100%。

各级团聚体 C/N、C/P 和 N/P 采用有机碳、全氮、全磷含量比值表示。使用 Office2010 和 SPSS22 对数据进行处理和分析，采用单因素方差法(one-way ANOVA)分析不同样地的团聚体粒径分布和化学计量特征，新复极差法（Duncan）进行显著性检验（α=0.05），选用变异系数判断元素化学计量比的变异程度，Person 相关系数评价不同环境团聚体中碳、氮、磷含量及其化学计量特征的相关水平，Origin 2018 绘图。

表 1 样地概况

Table 1 Overview of sample plot

类型 Type	海拔 Altitude (m)	坡度 Slope (°)	容重 Bulk density ($g\cdot cm^{-3}$)	含水量 Water content (%)	pH	颗粒组成 Particle composition(%)		
						砂粒 Sand	粉粒 Powder	黏粒 Clay
ND	1 907	14	1.16	21.85	6.75	20.86	74.27	4.87
PD	1 856	20	1.30	10.31	7.32	44.57	53.37	2.07
LD	1 834	17	1.38	20.01	7.69	46.70	51.23	2.08
MD	1 850	15	1.25	21.97	7.15	48.94	49.25	1.82
SD	1 860	23	1.43	18.86	7.20	47.15	50.70	2.16

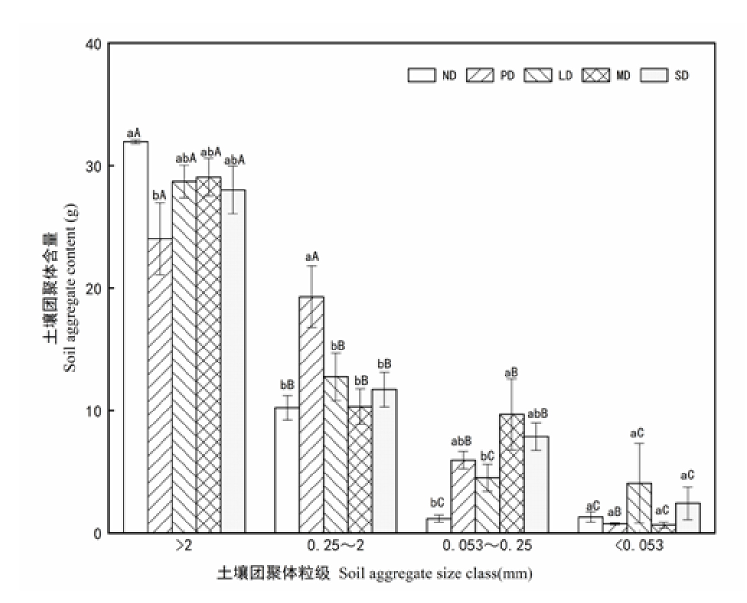
注：**ND**. 无石漠化；**PD**. 潜在石漠化；**LD**. 轻度石漠化；**MD**. 中度石漠化；**SD**. 强度石漠化。下同。

Note: **ND**. Nil rocky desertification; **PD**. Potential rocky desertification; **LD**. Light rocky desertification; **MD**. Moderate rocky desertification; **SD**. Strong rocky desertification. The same below.

2 结果与分析

2.1 不同石漠化等级团聚体组分和稳定性特征

不同石漠化等级样地中各级土壤团聚体组分具有明显的差异（图 1）。其中，无石漠化次生林地>2 mm 大团聚体含量分别是中度、轻度和强度的 1.09、1.12 和 1.14 倍，潜在灌木林地 0.25~2 mm 团聚体含量分别是轻度、中度和强度样地的 1.51、1.87 和 1.65 倍，并且其差异性达到显著水平，0.053~0.25 mm 粒级表现为无石漠化<轻度<潜在<强度<中度，变化范围是 1.17~9.67 g，五种样地内<0.053 mm 粒级无显著差异。此外，轻度灌草地、中度草地、强度裸露地和无石漠化次生林地四种环境中>2 mm 团聚体含量显著高于其余三种粒径，而潜在石漠化样地的>0.25 mm 团聚体含量显著大于 0.053~0.25 mm 和<0.053 mm 粒级。



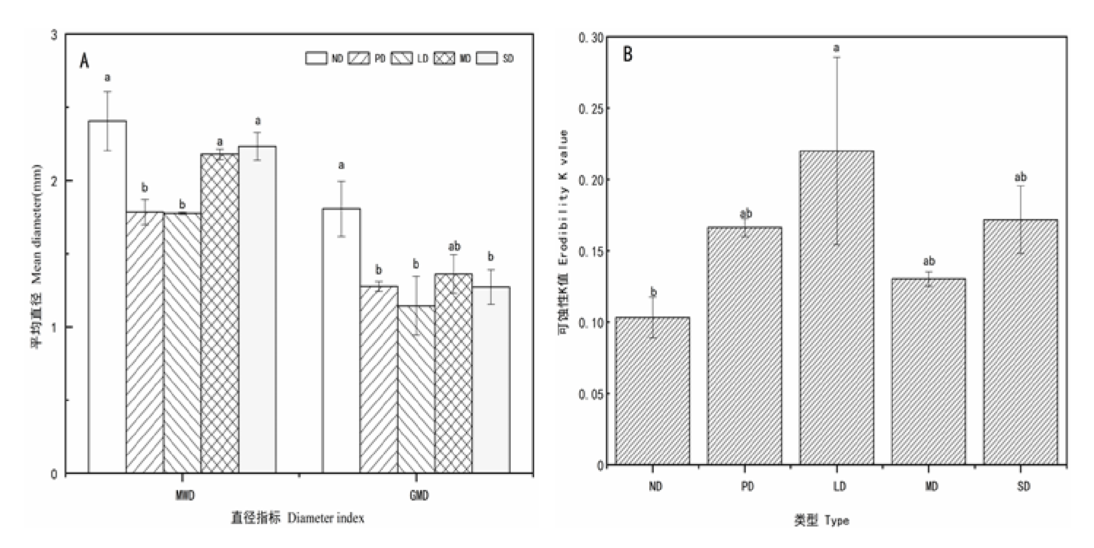
ND. 无石漠化；**PD**. 潜在石漠化；**LD**. 轻度石漠化；**MD**. 中度石漠化；**SD**. 强度石漠化。不同小写字母表示不同样地同一粒径团聚体含量在 $P<0.05$ 水平差异显著；不同大写字母表示相同样地不同粒径团聚体含量在 $P<0.05$ 水平差异显著。下同。

ND. Nil rocky desertification; **PD**. Potential rocky desertification; **LD**. Light rocky desertification; **MD**. Moderate rocky desertification; **SD**. Strong rocky desertification. Different lowercase letters represent same level of aggregate content at different sample plots at 0.05 level; Different capital letters represent different levels of aggregate content in the same sample plot at 0.05 level. The same below.

图 1 水稳性团聚体分布特征

Fig. 1 Particle size composition of water stable aggregate

基于团聚体分布状况和直径指标分别计算得到 MWD、GMD 及可蚀性 K 值（图 2）。由图 2：A 可知，团聚体 MWD、GMD 的变化趋势一致，无石漠化次生林 MWD、GMD 均显著强度裸露地、潜在灌木林和轻度灌草地；而 K 则与团聚体直径（MWD、GMD）呈反向变化趋势（图 2：B），轻度样地 K 值高，无石漠化样地 K 值最低。



MWD. 平均重量直径；**GMD**. 几何平均直径。

MWD. Mean weight diameter; **GMD**. Geometric mean diameter.

图 2 不同石漠化等级土壤团聚体指标

Fig. 2 Changes of soil aggregate stability indexes of different rocky desertification grades

2.2 土壤团聚体有机碳、全氮、全磷含量变化与分布特征

2.2.1 各粒级团聚体有机碳、全氮、全磷含量与分布

随着石漠化等级的加深，土壤团聚体中的养分含量出现不同程度的变化。如表 2 所示，不同石漠化环境中团聚体有机碳、全氮和全磷的变化范围是 20.78~56.28 g·kg^{-1}、1.17~2.14 g·kg^{-1} 以及 0.41~0.97 g·kg^{-1}。相较而言，潜在灌木林地四个粒径的团聚体有机碳含量最低，无石漠化次生林各粒级团聚体有机碳含量最高，且该样地中<0.25 mm 有机碳含量显著高于>2 mm 团聚体；同时，无石漠化样地中各粒级团聚体全氮含量也高于其他环境，轻度灌草地和中度草地中 0.25~2 mm 团聚体含量最高，而强度和无石漠化两种样地的最大值出现在 0.053~0.25 mm。此外，不同样地在>2 mm、0.053~0.25 mm 和<0.053 mm 三级中全氮含量的差异达到显著性水平；而同一样地中，仅潜在环境的不同粒级团聚体全氮含量有显著性差异。团聚体全磷含量除强度石漠化环境外，其他样地内均呈现随团聚体粒径减少其含量增加的趋势，中度、轻度、潜在及无石漠化样地内均表现为 0.053~0.25 mm 和<0.053 mm 粒级全磷含量显著高于>2 mm 和 0.25~2 mm。

表 2 不同石漠化环境水稳性团聚体碳氮磷含量

Table 2 Carbon, nitrogen and phosphorus contents of water stable aggregates in different rocky desertification environments (g·kg^{-1})

项目 Item	类型 Type	>2 mm	0.25~2 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm
有机碳 Organic carbon	ND	49.47±2.02aB	54.73±1.03aAB	55.02±1.67aA	56.28±1.80aA
	PD	20.78±2.00cA	21.04±1.60cA	21.27±3.36cA	22.97±2.58cA
	LD	35.55±3.78bA	37.48±3.14bA	36.29±1.73bA	37.63±2.88bA
	MD	34.40±6.94bA	38.42±4.07bA	38.40±3.49bA	39.22±3.31bA
	SD	37.46±3.29abA	39.00±2.76bA	39.10±2.90bA	40.09±3.07bA
全氮 Total nitrogen	ND	1.89±0.09aA	1.96±0.15aA	2.14±0.15aA	2.05±0.28aA
	PD	1.17±0.04bB	1.67±0.11aA	1.85±0.07abA	1.89±0.10abA
	LD	1.74±0.29aA	1.87±0.32aA	1.71±0.12bA	1.44±0.10bA
	MD	1.73±0.23aA	1.74±0.22aA	1.46±0.09bA	1.73±0.13abA
	SD	1.81±0.09aA	1.90±0.17aA	1.91±0.07abA	1.85±0.15abA
全磷 Total phosphorus	ND	0.41±0.05cB	0.50±0.05bB	0.73±0.04aA	0.63±0.09aA
	PD	0.54±0.00bB	0.54±0.00bB	0.89±0.09aA	0.81±0.03aA
	LD	0.55±0.01bB	0.58±0.02bB	0.86±0.07aA	0.87±0.09aA
	MD	0.77±0.03aB	0.76±0.02aB	0.89±0.04aA	0.97±0.05aA
	SD	0.78±0.01aA	0.77±0.02aA	0.77±0.07aA	0.89±0.02aA

注：不同小写字母表示不同样地同一粒径团聚体含量在 P<0.05 水平差异显著；不同大写字母表示相同样地不同粒径团聚体含量在 P<0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters represent same level of aggregate content at different sample plots at 0.05 level; Different capital letters represent different levels of aggregate content in the same sample plot at 0.05 level. The same below.

2.2.2 不同粒径团聚体的有机碳、全氮和全磷富集系数及其贡献率

富集系数（enrichment coefficient）是某一元素在不同粒级团聚结构中的富集程度，能有效反映其固持特征，当 EC>1 时，表示优先积累；而 EC<1 时则表明优先分解(张钦等，2019)。总体而言，水稳性团聚体中碳、氮、磷的 EC 值范围分别为 0.85~1.07、0.86~1.15 和 0.64~1.43 之间（表 3）。不同样地的有机碳富集系数存在差异，但其差异性尚未达到显著水平，5 种环境的<0.53 mm 级别的 EC 值均大于 1,处于优先积累的状态，且随团聚体粒径减小 EC 值呈波动上升的趋势。潜在和无石漠化样地的氮富集系数随着粒径减小出现分解-积累的变化趋势，

潜在和重度环境团聚体在粒径 2 mm 处富集系数由分解转变为优先积累的阶段。由表 3 可知，5 种样地的团聚体磷富集系数变化趋势与碳富集系数一致，>0.25 mm 的各样地 EC 值均小于 1，是分解状态；而除强度样地之外，其余 4 种环境在<0.25 mm 时进入优先积累的阶段。团聚体养分贡献率是结合团聚体含量与各粒径的养分丰度而来，能有效反映团聚结构体对土壤化学性质的影响。五种样地的有机碳、全氮和全磷 60%以上赋存于>0.25 mm 的大团聚体中，其中>2 mm 级别的团聚体贡献起主要作用，贡献范围为 34.29%~65.85%，<0.053 mm 团聚体贡献率最低（表 3）。除矿质颗粒(<0.053 mm)外，不同样地同一粒级土壤团聚体对碳氮磷含量的贡献水平具有显著的差异性，其中不同环境的>2 mm 团聚体中的碳氮贡献率差异较大，最小值低于 40%，而最大值接近 70%。

表 3 水稳性团聚体养分富集系数及贡献率

Table 3 Nutrient enrichment coefficient and contribution rate of water stable aggregates

项目 Item	类型 Type	>2 mm		0.25~2 mm		0.053~0.25 mm		<0.053 mm	
		富集系数 Enrichment Coefficient	贡献率 Contribution rate（%）	富集系数 Enrichment Coefficient	贡献率 Contribution rate（%）	富集系数 Enrichment Coefficient	贡献率 Contribution rate（%）	富集系数 Enrichment Coefficient	贡献率 Contribution rate（%）
有机碳 Organic carbon	ND	0.92±0.04a	65.85±3.16a	1.02±0.00a	23.20±1.95b	1.02±0.02a	2.67±0.67b	1.04±0.02a	3.08±1.05a
	PD	0.97±0.01a	46.43±5.32b	0.98±0.03a	38.04±5.38a	0.98±0.04a	11.53±0.91ab	1.07±0.01a	1.59±0.17 a
	LD	0.96±0.03a	55.17±1.14ab	1.02±0.02a	25.82±3.29b	0.99±0.04a	9.04±2.38ab	1.02±0.00a	8.31±6.66a
	MD	0.85±0.08a	48.87±2.86b	0.94±0.04a	19.27±2.57b	0.95±0.07a	18.78±6.17a	1.03±0.08a	1.26±0.44 a
	SD	0.96±0.01a	56.19±5.52ab	1.00±0.01a	24.34±2.31b	1.01±0.00a	16.57±2.44a	1.03±0.01a	5.02±2.68 a
全氮 Total nitrogen	ND	0.94±0.03a	67.35±3.02a	0.97±0.06a	21.96±0.59b	1.07±0.10a	2.71±0.57b	1.02±0.13ab	2.45±0.89a
	PD	0.71±0.03b	34.29±4.96b	1.02±0.07a	37.10±3.62a	1.12±0.03a	13.32±1.48a	1.15±0.06a	1.56±0.38a
	LD	1.01±0.08a	57.79±2.38a	1.09±0.08a	27.80±4.85ab	1.04±0.15a	9.79±3.62ab	0.86±0.06b	7.71±5.98a
	MD	1.03±0.06a	60.32±5.83a	1.03±0.05a	21.15±2.95b	0.88±0.05a	16.56±4.04a	1.05±0.10ab	1.37±0.59a
	SD	0.97±0.06a	57.40±7.90a	1.01±0.05a	24.87±3.85b	1.02±0.02a	16.94±2.71a	0.99±0.03ab	4.89±2.69a
全磷 Total phosphorus	ND	0.64±0.06c	45.83±4.05ab	0.79±0.09b	18.32±3.45b	1.14±0.02ab	3.03±0.85b	1.43±0.11a	2.77±0.80a
	PD	0.78±0.02b	37.38±5.00b	0.77±0.02b	29.77±3.67a	1.28±0.09a	15.42±2.72a	1.17±0.06b	1.71±0.20a
	LD	0.77±0.01b	44.30±2.17ab	0.81±0.03ab	20.73±3.68ab	1.21±0.10a	10.41±1.84ab	1.21±0.12ab	6.27±4.79a
	MD	0.91±0.02a	52.65±2.51a	0.90±0.01ab	18.49±2.60b	1.05±0.06ab	20.26±6.32a	1.14±0.05b	1.37±0.59a
	SD	0.98±0.03a	57.43±6.72a	0.96±0.04a	23.11±1.46ab	0.96±0.07b	15.41±1.29a	1.11±0.01b	4.89±2.69a

2.3 各粒级土壤团聚体化学计量特征

表 4 所示为不同石漠化环境中 0~20 cm 土层土壤团聚体内有机碳、全氮和全磷生态化学计量比值。由表 4 可知，5 种环境 C/N、C/P 和 N/P 的变化范围分别是 11.50~28.60、25.19~121.75 和 1.65~4.69，变异系数依次是 31.65%、52.20%和 29.23%。无石漠化次生林四级团聚体 C/N 高于其余样地，其中<0.053 mm 粒级最大，除>2 mm 外，其他粒径的差异性达到显著水平，整体上均表现为无石漠化>中度>轻度>重度>潜在。潜在灌木林地各团聚体 C/P 均显著低于其他四种样地，其中无石漠化团聚体各粒径 C/P 分别是潜在的 3.3、2.84、2.99 和 2.18 倍。无石漠化的 C/P 最大值为>2 mm 粒级，且同一样地内>0.25 mm 的 C/P 显著高于 0.053~0.25 mm 和<0.053 mm 粒级，而强度环境则是 0.053~0.25 mm 粒级最大；潜在、中度和重度样地内不同粒级之间的比值无显著差异。相比团聚体 C/N 和 C/P 而言，N/P 的变化范围较小，无石漠化和中度环境下随着粒级变小，N/P 呈“增加-减少-增加”的“N”字型变化；无石漠化样地的各团聚体 N/P 高于其余环境。

表 4 水稳性团聚体有机碳、全氮、全磷的化学计量特征

Table 4 Stoichiometric characteristics of organic carbon, total nitrogen and total phosphorus of

water stable aggregates

项目 Item	类型 Type	>2mm	0.25~2mm	0.053~0.25mm	<0.053mm
	ND	26.28±1.31aA	28.26±1.75aA	25.86±1.12aA	28.60±4.36aA
碳氮比	PD	17.97±2.27aA	12.56±0.26bAB	11.50±1.70bB	12.40±2.14bAB
（C/N）	LD	21.07±2.14aA	20.87±2.78abA	21.50±2.15aA	26.26±1.84aA
	MD	21.29±6.36aA	23.36±6.03aA	26.35±5.19aA	24.71±5.94aA
	SD	20.87±2.68aA	20.69±1.23abA	20.50±1.41aA	21.75±1.41abA
	ND	121.75±9.48aA	111.39±13.42aA	75.52±5.56aB	61.78±5.57aC
碳磷比	PD	38.67±4.00cA	39.25±3.11bA	25.19±6.76cA	28.28±3.23bA
（C/P）	LD	67.32±5.79bA	64.72±4.71bA	42.27±1.36bcB	44.69±7.13abB
	MD	45.62±10.27bcA	51.25±11.79bA	43.93±9.48bA	43.13±8.88abA
	SD	47.97±4.63bcA	51.12±4.76bA	51.16±0.85bA	45.23±3.27abA
	ND	4.69±0.57aA	4.03±0.76aAB	2.95±0.36aAB	2.26±0.40aB
氮磷比	PD	2.17±0.05bA	3.12±0.22abB	2.12±0.24bB	2.33±0.16aB
（N/P）	LD	3.16±0.55bA	3.21±0.48abA	2.01±0.24bAB	1.71±0.27aB
	MD	2.27±0.29bA	2.29±0.31bA	1.65±0.06bA	1.79±0.14aA
	SD	2.32±0.14bA	2.49±0.27bA	2.52±0.19abA	2.10±0.20aA

2.4 石漠化过程中土壤团聚体 C、N、P 及其化学计量比的相关性

对不同环境中水稳性团聚体有机碳、全氮和全磷以及其化学计量比进行 Person 相关系数评价（表 5）。结果显示，全土与水稳性团聚体 C、N、P 之间存在不同的相关程度，其中全土与各级团聚体有机碳含量呈极显著正相关，变化范围是 0.941~0.987；全土与>2 mm 和 0.25~2 mm 粒级的 P 元素呈极显著相关，相关程度随粒级的变小逐渐降低的趋势；而全土的 N 元素仅和 0.25~2 mm 粒径呈显著正相关。团聚体中有机碳与团聚体的 C/N 和 C/P 的相关程度达到极显著水平，各粒级团聚体中 C 分别与 C/N 和 C/P 的相关系数均高于 0.8，而团聚体中 N 和 C:N 的相关程度与 C 和 C:N 呈逆向变化特征；同时，各粒级团聚体的 P 元素分别与 C/P 和 N/P 呈负相关，整体而言，前者的相关程度低于后者。

表 5 水稳性团聚体养分及其化学计量特征的关系

Table 5 Relationship between nutrients and stoichiometric characteristics of water stable aggregates

项目 Item	>2 mm	0.25~2 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm
C_{SOIL}-C_{WSA}	0.941**	0.983**	0.965**	0.987**
N_{SOIL}-N_{WSA}	-0.019	0.621*	0.488	0.065
P_{SOIL}-P_{WSA}	0.928**	0.839**	0.346	0.325
C_{WSA}-C:N_{WSA}	0.877**	0.849**	0.898**	0.949**
C_{WSA}-C:P_{WSA}	0.807**	0.861**	0.944**	0.923**
N_{WSA}-C:N_{WSA}	-0.881**	-0.477	-0.399	-0.657**
N_{WSA}-N:P_{WSA}	0.673**	0.651**	0.817**	0.853**
P_{WSA}-C:P_{WSA}	-0.712**	-0.544*	-0.687**	-0.137
P_{WSA}-N:P_{WSA}	-0.532*	-0.592*	-0.776**	-0.597*

注：*表示 $P<0.05$; **表示 $P<0.01$。

Note: *means $P<0.05$; ** means $P<0.01$.

3 讨论

土壤团聚体作为保持与供应土壤肥力的物质基础，其分布特征及稳定性水平与土壤质量、生物活性和渗透率等有着密切联系（Amezketa, 1999）。一般将>0.25 mm大团聚体含量和团聚体直径指标（MWD、GMD）作为评价土壤团聚结构稳定性水平的重要指标（徐红伟等，2018）。本研究表明，五种石漠化等级样地内均以>0.25 mm级团聚体为主，无石漠化次生林环境中团聚体MWD、GMD明显高于其余四种样地，这主要是因为林地的凋落物含量高，能有效促进土壤中有机胶结剂的形成，利于提高团聚体稳定性水平(Tamura, 2017)，进而在一定程度上改善了无石漠化样地的土壤结构；同时，K值呈现先上升后下降的变化趋势，表明土壤抵抗侵蚀的能力未随着石漠化程度的加深而一直下降，这一现象可能是由于不同石漠化环境中裸岩集聚分布所致（盛茂银等，2012）。显然，相较而言，无石漠化次生林地土壤结构更好。

有机碳是土壤生态系统物质循环的重要因素，在维持土壤结构、保持水土方面有关键作用（Tamura et al., 2017）。已有研究表明，地表大约百分之九十的有机碳储存于团聚结构中，土粒团聚程度直接影响土壤有机碳的积累和固定（Six et al., 2000）；土壤氮素是影响植物生长的必要元素，主要源自植物残体分解与合成过程中形成的有机物质（王绍强和于贵瑞，2008）。一般地，土壤碳氮变化特点具有一致性，两者存在明显的耦合关系（Xiao et al., 2017）。本研究中，5 种样地各级团聚体有机碳含量变化特征表现为无石漠化>强度>中度>轻度>潜在，全氮含量变化显示为无石漠化>强度>轻度>中度>潜在，其中无石漠化样地有机碳和全氮含量明显高于其它四种环境，可能是因为无石漠化次生林地中植物的输入量和动植物残体的归还量较高（瞿晴等，2019），有效地增加了表土中有机质含量，从而促进氮元素的积累；但是土壤团聚体碳氮养分并没有随着石漠化程度加重而下降，其中强度裸露地团聚体有机碳和全氮含量明显高于其它三种样地，这可能是强度石漠化样地中分布大量根系发达的草本植物，能在维持有机碳快速周转地同时减少消耗(吴丽芳等，2019)，再加上该类样地地表岩石裸露面积大，有利于大气沉降中的氮元素直接被土壤吸收(宋欢欢等，2014)。此外，五种样地中各粒级中全磷含量较低且无明显规律，可能是由于土壤中的磷是沉积性元素，源于土壤母质，受成土过程、风化特征和土壤侵蚀等的影响，低纬度地区风化淋溶作用强烈（Hou et al., 2015），再加上本研究区内土壤侵蚀现象严重所致。

土壤 C/N/P 作为衡量土壤碳、氮、磷矿化和固持作用的重要指标，受区域环境、成土条件和人为活动等因素的影响，具有明显的空间变异性（王绍强和于贵瑞，2008）。本研究中，不同石漠化等级样地 0~20 cm 范围内，各粒级土壤团聚体 C/N、C/P 和 N/P 的变化范围分别是 11.50~28.60、25.19~121.75 和 1.65~4.69。五种样地 C/N 都高于中国陆地土壤均值(12.3)（Tian et al., 2010），且与无石漠化样地 C/N 差值最大，团聚体中较高的 C/N 值，可能是因为该地土壤有机质腐化程度低，全氮含量增加速度缓慢所致（Zhang et al., 2013）；随着石漠化程度加重，团聚体 C/N 值呈现下降-上升-下降的 "N"字形变化，表明石漠化演替过程中，土壤碳、氮元素在积累与消耗过程中的变化不稳定，这与 Clevelan & Liptzin（2007）的研究结论不同，可能是由于不同等级石漠化环境中土壤退化使得 C、N 养分循环遭到破坏，导致土壤生态系统中养分循环处于不稳定的状态。本研究表明，团聚体 C/P 变化范围较大，中国陆地土壤 C/P 均值(61)（Tian et al., 2010）高于潜在、轻度、中度和强度四种样地，而低于无石漠化样地；相关性分析发现团聚体 C/P 与 C 呈极显著正相关，并且相关程度高于 P，说明团聚体 C 对 C/P 值的影响更强烈，这种差异可能是由于团聚体中碳含量增加速率高于磷含量导致的（区晓琳等，2018），同时大粒径团聚体 C/P 值大于小粒径团聚体，表明大粒径团聚体中 P 元素较低，土壤微生物对 P 有同化趋势(李玮等，2015)。土壤中的氮、磷元素是生态系统中重要的限制性元素，将 N/P 作为预测土壤养分限制类型的重要指标（王绍强和

于贵瑞，2008）。由于不同粒径大小的团聚体 N、P 元素分布特征不同导致团聚体 N/P 明显不同。本研究中，随着石漠化程度的加重，土壤 N/P 呈现先下降后上升的趋势，说明磷的限制性呈现先减弱后增强的情况。5 种样地 N/P 整体处于较低的水平，各团聚体 N/P 均低于中国陆地土壤 N/P 的平均水平（（Tian et al., 2010）；土壤团聚体 N/P 与 N 呈极显著正相关，并且相关程度高于 P，说明 N 对团聚体 N/P 的影响更大。因此在研究区石漠化演替过程中，由于团聚体 N 元素增长缓慢，导致团聚体中 N 元素成为石漠化区土壤恢复过程的主要限制性元素。此外，团聚体 N/P 最高值大部分出现在粒径>0.25 mm 的团聚体中，表明大粒径团聚体受 P 素的限制作用更明显。

4 结论

（1）石漠化演变过程中，不同石漠化环境种团聚体稳定性、各级团聚体中碳、氮、磷含量及其化学计量比存在显著性差异。其中，无石漠化环境中大团聚体（>0.25 mm）含量、团聚体直径 (MWD、GMD)高于潜在、轻度、中度和强度石漠化样地，且可蚀性 K 值低于其余 4 种样地。

（2）无石漠化样地四个粒级团聚体中有机碳和全氮含量最高，各样地全磷含量有明显差异，5 种样地小粒径团聚体的有机碳、全氮和全磷含量高于较大粒径。与团聚体 C/N 和 C/P 相比，N/P 变异性较小，土壤 C/N 在小粒径结构中较高，而 C/P 和 N/P 最大值均出现在>0.25 mm 粒级内。

参考文献：

AMEZKETA E, 1999. Soil aggregate stability: A review[J]. J Sustain Agric, 14(2-3): 83-151.

AN SS, ZHANG Y, ZHENG FL, 2008. Fractal characteristics of soil aggregates and their response to vegetation restoration in Loess Hilly Area[J]. Sci Soil Water Conserv, 1(2): 66-70. [安韶山，张扬，郑粉莉，2008．黄土丘陵区土壤团聚体分形特征及其对植被恢复的响应[J]. 中国水土保持科学，1(2)：66-70.]

BLANCO-CANQUI H, LAL R, 2004. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates[J]. Critical Rev in Plant Sci, 23(6): 481-504.

CLEVELAND CC, LIPTZIN D, 2007. C: N: P Stoichiometry in Soil: Is There a “Redfield Ratio” for the microbial biomass? [J]. Biogeochemistry, 85(3): 235-252.

DEVINE S, MARKEWITZ D, HENDRIX P, et al., 2014. Soil aggregates and associated organic matter under conventional tillage, no-tillage, and forest succession after three decades[J]. PLoS ONE, 9(1): 1-12.

GUO K, LIU CC, DONG M, 2011. Ecological adaptability of karst plants and rocky desertification control in Southwest China [J]. Acta Plant Ecol, 35(10):991-999. [郭柯，刘长成，董鸣，2011．我国西南喀斯特植物生态适应性与石漠化治理[J]. 植物生态学报，35(10)：991-999.]

GUO W, SHI ZH, CHEN LD, et al., 2007. Effect of aggregate size of red soil on slope erosion process [J]. Acta Ecol Sin, 27(6): 2516-2522. [郭伟，史志华，陈利顶，等，2007. 红壤表土团聚体粒径对坡面侵蚀过程的影响[J]. 生态学报，27(6)：2516-2522.]

HOU EQ, CHEN CG, WEN DZ, et al., 2015. Phosphatase activity in relation to key litter and soil properties in mature subtropical forests in China[J]. Sci Total Environ, 515-516(15): 83-91.

LAN JC, SHEN Y, 2020. Effects of vegetation restoration on soil aggregate organic carbon and carbon pool management index in Karst Valley area [J]. Guihaia, 40(6): 765-775. [蓝家程，沈

艳，2020. 岩溶槽谷区植被恢复对土壤团聚体有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 广西植物，40(6)：765-775.]

LI W, ZHENG ZC, LI TX, 2015. Ecochemical characteristics of soil aggregates with different tea planting years [J]. Chin J Appl Ecol, 26(1): 9-16. [李玮，郑子成，李廷轩，2015. 不同植茶年限土壤团聚体碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 应用生态学报，26(1)：9-16.]

LIU J, MA YT, WANG XL, et al., 2019. Effects of land use patterns on soil aggregate stability and organic carbon in Weibei dryland [J]. Environ Sci, 40 (7): 3361-3368. [刘杰，马艳婷，王宪玲，等，2019. 渭北旱塬土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. 环境科学，40(7)：3361-3368.]

LU Y, LONG J, LIAO HK, et al., 2017. Study on the nutrient and enzyme activities of soil aggregates under different land use patterns in Karst Area—Taking Huajiang as an example[J]. Environ Chem, 36(4): 821-829. [卢怡，龙健，廖洪凯，等，2017. 喀斯特地区不同土地利用方式下土壤团聚体中养分和酶活性的研究——以花江为例[J].环境化学，36(4)：821-829.]

LUO M, ZHOU YC, 2010. Study on the stability of soil aggregates developed from carbonate rock in Karst Area[J]. Res Agric Modern, 31(4): 496-500. [罗明，周运超，2010. 喀斯特地区碳酸盐岩发育土壤团聚体稳定性研究[J]. 农业现代化研究，31(4)：496-500.]

QIU LP, ZHANG XC, ZHANG JA, 2006. Distribution of nutrients and enzymes in soil aggregates for long-term fertilization on the Loess Plateau [J]. Acta Ecol Sin, 26(2): 59-67. [邱莉萍，张兴昌，张晋爱，2006. 黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布[J]. 生态学报，26(2)：59-67.]

QU Q, XU HW, WU X, et al., 2019. Stability and stoichiometric characteristics of soil aggregates of artificial *Robinia pseudoacacia* forest in different vegetation zones of the Loess Plateau[J]. Environ Sci, 40(6): 2904-2911. [瞿晴，徐红伟，吴旋，等，2019. 黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征[J]. 环境科学，40(6)：2904-2911.]

XU X, LI D, CHENG X, et al., 2016. Carbon: nitrogen stoichiometry following afforestation: A global synthesis[J]. Sci Rep, 6(1): 1-8.

QU XL, CHEN ZB, CHEN ZQ, et al., 2018. Chemometric characteristics of soil aggregates during Vegetation Restoration in subtropical eroded red soil area[J]. Acta Pedol Sin, 55(5): 119-130. [区晓琳，陈志彪，陈志强，等，2018. 亚热带侵蚀红壤区植被恢复过程中土壤团聚体化学计量特征[J]. 土壤学报，55(5)：119-130.]

SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K, 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture [J]. Soil Biol Biochem, 32(14): 2099-2103.

SHENG MY, LIU Y, XIONG KN, 2013. Response of soil physical and chemical properties in succession of karst rocky desertification in South China[J]. Acta Ecol Sin, 33(19): 350-360. [盛茂银，刘洋，熊康宁，2013. 中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应[J]. 生态学报，33(19)：350-360.]

SHIRAZI MA, BOERSMA L, 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture[J]. Soil Sci Soc Am J, 48(1): 142-147.

SONG HH, JIANG CM, YU WT, 2014. Basic features and monitoring methodologies of atmospheric nitrogen deposition[J]. Chin J Appl Ecol, 25(2): 599-610. [宋欢欢，姜春明，宇万太，2014. 大气氮沉降的基本特征与监测方法[J]. 应用生态学报，25(2)：599-610.]

TAMURA M, SUSEELA V, SIMPSON M, et al., 2017. Plant litter chemistry alters the content and composition of organic carbon associated with soil mineral and aggregate fractions in

invaded ecosystems[J]. Glob Change Biol, 23(10): 4002–4018.
TIAN HQ, CHEN GS, ZHANG C, et al., 2010. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 98(1-3): 139-151.
TAN QJ, SONG TQ, PENG WX, et al., 2014. Stability and organic carbon characteristics of soil aggregates in different ecosystems of canyon karst[J]. Chin J Appl Ecol, 25(3): 671-678 [谭秋锦，宋同清，彭晚霞，等，2014. 峡谷型喀斯特不同生态系统土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J]. 应用生态学报，25(3)：671-678.]
UDOM BE, OGUNWOLE JO, 2015. Soil organic carbon, nitrogen, and phosphorus distribution in stable aggregates of an Ultisol under contrasting land use and management history[J]. J Plant Nutr Soil Sci, 178(3): 460-467.
WANG H, YAO X, YANG H, et al., 2017. Effects of different land cover types on soil aggregate organic carbon in Karst Area [J]. Ecol Environ Sci, 26(9): 1506-1513. [王浩，姚昕，杨慧，等，2017. 岩溶区不同土地覆被方式对土壤团聚体有机碳的影响[J]. 生态环境学报，26(9)：1506-1513.]
WANG PJ, DAI QH, DING GJ, et al., 2014. Changes of soil anti erodibility during Vegetation Restoration in degraded karst[J]. Acta Pedol Sin, 51(4): 806-815. [王佩将，戴全厚，丁贵杰，等，2014. 退化喀斯特植被恢复过程中的土壤抗蚀性变化[J]. 土壤学报，51(4)：806-815.]
WANG SQ, YU GR, 2008. Ecological chemometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in ecosystem[J]. Acta Ecol Sin, 28(8): 457-467. [王绍强，于贵瑞，2008. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报，28(8)：457-467.]
WANG J, LIU ZQ, BAO EY, et al., 2019. Effects of forest and grass restoration on soil aggregates and organic carbon content in karst rocky desertification area [J]. J Soil Water Conserv, 33(6): 249-256. [王进，刘子琦，鲍恩俣，等，2019. 喀斯特石漠化区林草恢复对土壤团聚体及其有机碳含量的影响[J]. 水土保持学报，33(6)：249-256.]
WEI XR, LI XZ, JIA XX, et al., 2013. Accumulation of soil organic carbon in aggregates after afforestation on abandoned farmland [J]. Biol Fert Soils, 49(6): 637-646
WU LF, WANG ZQ, WANG Y, et al., 2019. Relationship between soil C, N, P stoichiometric characteristics and enzyme activities in different rocky desertification degrees in Karst Plateau [J]. Ecol Environ Sci, 28 (12): 2332-2340. [吴丽芳，王紫泉，王妍，等，2019 . 喀斯特高原不同石漠化程度土壤 C、N、P 化学计量特征和酶活性的关系[J]. 生态环境学报，28(12)：2332-2340.]
XIAO SS, ZHANG W, YE YY, et al., 2017. Soil aggregate mediates the impacts of land uses on organic carbon, total nitrogen, and microbial activity in a Karst ecosystem[J]. Sci Rep, 7: 41402.
XIONG KN, CHEN YB, CHEN H, 2011. Turning stone into gold: technology and model of controlling rocky desertification in Guizhou[M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press. [熊康宁，陈永毕，陈浒，2011. 点石成金——贵州石漠化治理技术与模式[M]. 贵阳：贵州科技出版社.]
XIONG KN, LI P, ZHOU ZF, 2002. Remote sensing of karst stony desertification—A Typical research of GIS/Taking Guizhou Province as an example[M]. Beijing: Geology Publishing House. [熊康宁，黎平，周忠发，2002．喀斯特石漠化的遥感-GIS 典型研究-以贵州省为例[M]．北京：地质出版社.]
XU HW, WU Y, QIAO LL, et al., 2018. Soil aggregates and their stability in the process of ecological restoration in different vegetation zones: A case study of the Loess Plateau[J]. Chin

Environ Sci, 38 (6): 2223-2232. [徐红伟，吴阳，乔磊磊，等，2018. 不同植被带生态恢复过程土壤团聚体及其稳性—以黄土高原为例[J]. 中国环境科学，38(6)：2223-2232.]

YU YF, PENG WX, SONG TQ, et al., 2014. Chemometric characteristics of C, N, P in different forest types and soils in karst peak cluster depression[J]. Acta Appl Ecol, 25(4): 947-954. [俞月凤，彭晚霞，宋同清，等，2014. 喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. 应用生态学报，25(4)：947-954.]

ZHANG ZS, SONG XL, LU XG, et al., 2013. Ecological stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in estuarine wetland soils: influences of vegetation coverage, plant communities, geomorphology, and seawalls[J]. J Soils Sed, 13(6): 1043-1051.

ZHANG Q, ZHANG AH, YAO DJ, et al., 2019. Nitrogen distribution and fixation characteristics of soil aggregates in cultivated layer under continuous planting of different green manure crops[J]. Chin J Soil Sci, 50(3): 577-584. [张钦，张爱华，姚单君，等，2019. 连续种植不同绿肥作物的耕层土壤团聚体中氮分布及其固持特征[J]. 土壤通报，50(3)：577-584.]